Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.173-191 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199 Open access

Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area)

Zahra Azarm[a], Hamid Mehrabi[b]*, Saied Nadi[c]

[a]MA Student in Remote Sensing, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[b]Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of civil and transportation engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[c] Department of Geomatics Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran;b Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada

Received: 4 April 2022 ***Revised: 22 May 2022*** ***Accepted: 9 June 2022***

Abstract

Land subsidence induced by soil consolidation is one of the natural hazards that occur gradually. This phenomenon has reached its critical state in most regions of Iran. Factors affecting subsidence are groundwater level depletion, land cover, soil type, elevation, slops gradient, rock bed depth, etc. The causes of subsidence should be investigated so that decisions could be based on the real characteristics of the region. Decrease in groundwater level is one of the most important factors that influences subsidence but due to the complexity of the relationship between subsidence and other factors, a direct linear relationship between groundwater level and subsidence cannot be considered. The study aimed to investigate the relationship between subsidence and groundwater changes through relationship between the two parameters in the period 2014 to 2018 in Isfahan. In this regard, the time series of radar interferometry and the time series of water levels of piezometric wells in the Isfahan were studied. The results show that in 12% of the wells, no correlation exists, in 9%, poor positive ignorable correlation, in 12%, fair positive correlation, in 48%, significant positive correlation, in 6%, poor negative ignorable correlation, in 4% fair negative correlation and in 9% there is a strong and negative significant correlation between the subsidence rate and the groundwater level. Correlation values show the complexity of the relationship between subsidence and water level depletion. Therefore, the relationship between subsidence and its causative factors requires more detailed studies and comprehensive models.

Keywords: Subsidence, Radar Interferometry, Time Series Analysis, Groundwater Level, Piezometric Wells

*. Corresponding author: Hamid Mehrabi Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir Tel: + 983137935297

How to cite this Article: Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 173-191.
DOI:10.22067/geoeh.2022.75774.1199

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۹۱-۱۷۳

مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان)

زهرا آزرم- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، گروه نقشه‌برداری، دانشکده حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

حمید مهرابی[1]- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان.

سعید نادی- استادیار سابق گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان. محقق دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه کارلتون، اوتاوا، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۹

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات طبیعی است که به‌صورت تدریجی اتفاق می‌افتد، این پدیده در اکثر مناطق ایران به وضعیت بحرانی رسیده است. عوامل تأثیرگذار بر فرونشست شامل تغییرات سطح آب زیرزمینی، جنس خاک، عمق بستر سنگی و ... است. برای جلوگیری از پیشروی فرونشست باید علل رخداد آن بررسی شود تا با توجه به ویژگی‌های هر منطقه تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر واقعیت باشد. افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم مؤثر بر فرونشست است ولی به دلیل پیچیدگی ارتباط فرونشست با عوامل تأثیرگذار دیگر، نمی‌توان به‌صورت عام یک رابطه خطی مستقیم بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست در نظر گرفت. این تحقیق با هدف بررسی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی به بررسی همبستگی بین دو پارامتر مذکور در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان پرداخته است. در این راستا سری زمانی تداخل سنجی راداری و سری زمانی سطح آب چاه‌های پیزومتری در منطقه اصفهان موردبررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، در ۱۲٪ از چاه‌ها، عدم همبستگی،

۱ نویسنده مسئول: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷ Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

آزرم، زهرا؛ مهرابی، حمید؛ نادی، سعید؛ ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی اصفهان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۴). صص ۱۹۱-۱۷۳
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199

در ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت، در ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت، در ٤٨٪ همبستگی قوی و مثبت، در ٦ ٪ همبستگی ضعیف و منفی، در ٤٪ همبستگی متوسط و منفی و در ۹٪ همبستگی قوی و منفی بین میزبان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی وجود دارد. مقادیر همبستگی پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و افت سطح آب را نشان می‌دهد. پیچیدگی ارتباط میزان فرونشست و عوامل ایجاد آن، نشان دهنده لزوم انجام بررسی‌های دقیق‌تر و ارائه مدل‌های جامع‌تر است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، تحلیل سری زمانی، سطح آب زیرزمینی، چاه‌های پیزومتری

۱-مقدمه

افت تدریجی ارتفاع سطح زمین که با جابه‌جایی‌های ناچیز افقی همراه است را فرونشست گویند. به دلیل تدریجی بودن آن و ایجاد خسارات غیرقابل‌جبران، این پدیده را زلزله خاموش می‌نامند. آب حاصل از بارندگی یا ذوب برف‌ها، در عمق خاک حرکت می‌کند تا به لایه‌های غیرقابل نفوذ می‌رسد، سپس تمام منافذ را پر می‌کند و منطقه اشباعی را به وجود می‌آورد که به آن آبخوان (لایه‌های آبدار یا آبخوانه) گفته می‌شود. برداشت آب زیرزمینی به علت افت سطح ایستابی و کاهش فشار سیال و افزایش فشار بین ذرات خاک، منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست می‌شود (علیزاده، ۱۳٦٧).

مشاهدات سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی (GPS[1]) و شبکه‌های ترازیابی دقیق دو روش ژئودتیکی برای پایش فرونشست است. هر دو این روش‌ها محدود به ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند و نیاز به حضور در منطقه، انجام مشاهدات میدانی، صرف وقت و هزینه زیاد دارند. از دیگر روش‌های ژئودتیکی پایش فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی راداری است، به دلیل تدریجی بودن پدیده فرونشست برای بررسی آن باید از روش‌های سری زمانی استفاده کرد، ازجمله این روش‌ها، تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی (PSInSAR[2]) و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری بر مبنای طول خط مبنای کوتاه (SBAS[3]) هستند. در این تحقیق برای محاسبه فرونشست از روش PSInSAR استفاده شده است، این روش به دلیل استفاده از نقاط پراکنشگر دائمی قادر است فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز را کاهش دهد. در تحقیقات متعددی نتایج این روش با مشاهدات GPS و ترازیابی دقیق مقایسه شده‌اند که نشان داده شده، دقت روش PSInSAR در حد میلی‌متر است (تامبورینی و همکاران، ۲۰۱۰)[4]، (روچی و همکاران، ۲۰۱۲)[5]. نتایج

1 Global Positioning System
2 Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar
3 small baseline subset
4 Tamburini et al.
5 Rucci et al.

این روش همبســـتگی بالایی با مشـــاهدات GPS و ترازیابی دقیق دارد (بیســـواس و همکاران، ۲۰۱۸)[1]، (چانگ و همکاران، ۲۰۱۰)[2]، (خرمی و همکاران ۲۰۱۹)[3]. تداخل‌سـنجی راداری در دهه اخیر به‌طور گسترده در زمینه مطالعات فرونشـــست زمین موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. در تحقیقی جابه‌جایی‌های پل هنگ کنگ–ژوهای–ماکائو[4] با اسـتفاده از روش PSInSAR، با ۸۶ تصویر سنتینل[5] از ٦ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر با استفاده از ۲۰۲۰ محاسبه شده اســت. نتایج این تحقیق نشـان داده اسـت که حداکثر نرخ سالانه فرونشست در این منطقه ۱۷ میلی‌متر است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱)[6]. در مقاله‌ای با اســـتفاده از روش PS-InSAR و داده‌های Cosmo-skymed در بازه زمانی ۸ ژوئن ۲۰۱۱ تـا ۱۵ نوامبر ۲۰۱۷، تصـــاویر ســـتینـل در بـازه زمـانی ۱۸ دســـامبر ۲۰۱٤ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۱۸ و تصـــاویر ALOS PALSAR در بازه زمانی ۱۹ ژانویه ۲۰۰۷ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۱۱ جهت محاســـبه فرونشـــســـت منطقه دهلی[7] اسـتفاده شده است، در این مقاله میانگین جابه‌جایی‌های این منطقه را با داده Cosmo-skymed، ۱۵ میلی‌متر در سال، حداکثر جابه‌جایی محاسـبه شـده از تصـاویر ALOS، ۱۰ تا ۱۸ میلی‌متر در سال و جابه‌جایی‌های حاصل از تصاویر سـتینل، ۲ تا ١٦ میلی‌متر در سال آورده شده است (ملیک و همکاران،۲۰۲۱)[8]. فرونشست شهر چانگچون جین را با اسـتفاده از روش PSInSAR با تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۲۰۱٦ تا ۲۰۲۰ محاسبه شده و نتایج این مقاله نشان داده اسـت که حداکثر نرخ سـالانه فرونشـست این منطقه، ۲۰/٤٥ میلی‌متر و میانگین نرخ سالانه فرونشست ۲/۹۸ میلی‌متر اسـت، همچنین در این تحقیق همبسـتگی بین نتایج PSInSAR و داده‌های ترازیابی درجه ۲، ۰/٦۷ به دست آمده که این مقدار همبستگی به قابل‌اطمینان بودن نتایج PSInSAR اشاره دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱)[9]. در تحقیقی دیگر نقشــه فرونشست در جینگهای[10] چین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر تراسار[11] تهیه شده است، بیشترین مقدار فرونشـــست در سال ۲۰۰۹ در قسمت شرق منطقه مطالعاتی اتفاق افتاده که این مقدار بین ٤۰ تا ۵۰ میلی‌متر، در بخش شـــمالی حدود ۲۲ تا ۳۲ میلی‌متر و در مناطق مسـکونی وسیع مقدار فرونشست بین ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر گزارش شـده اسـت (لیو و همکاران، ۲۰۱۰)[12]. فرونشـــست منطقه اولسان[13] با روش PSInSAR و SBAS در بازه ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۱ بررسی کرده‌اند نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ فرونشست به دست آمده از روش SBAS، ٤/٤

1 Biswas et al.
2 Chang et al.
3 Khorrami et al.
4 Hong Kong–Zhuhai–Macao
5 Sentinel-1A
6 Xiong et al.
7 Dehli NCR
8 Malik et al.
9 Wang et al.
10 Jinghai
11 TerraSAR-X
12 Liu et al.
13 Ulsan

سانتی‌متر در سال و از روش PSInSAR، ٤ سانتی‌متر است (جو و همکاران، ۲۰۱۱)[1]. نرخ فرونشست در مکزیک در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ با داده‌های ماهواره انویست[2] با استفاده از روش PSInSAR، ۸ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند، نتایج نشان داده که حداکثر فرونشست در اطراف چاه‌ها است (بکسی و همکاران، ۲۰۱۹)[3]. تحقیقات متفاوتی جهت بررسی روابط بین فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است، در بعضی از این تحقیقات تنها تأثیر عامل تغییرات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست بررسی و بدون توجه به تأثیرات سایر عوامل، بین مقادیر فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی رابطه خطی ارائه شده است. در تحقیقی نرخ فرونشست در بندر اینچئون[4] واقع در بوسان[5] کره را با JERS-1[6] با استفاده از روش PSInSAR، ۳۰ میلی‌متر در سال و در منطقه ایستگاه راه‌آهن ژوئان[7]، ۱۵ میلی‌متر در سال تخمین زده‌اند، درنهایت در این مقاله دلیل اصلی فرونشست در این منطقه ساحلی را افزایش سطح آب دریا دانسته‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۰۷)[8]. در پژوهشی دیگر نقشه فرونشست دشت لیائوها[9] در چین را با تصاویر ALOS/PALSAR با استفاده از روش PSInSAR در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ تهیه شده است، طبق نقشه ارائه شده در این مقاله حداکثر نرخ فرونشست در این منطقه ۲۳٦ میلی‌متر در سال و کل مقدار فرونشست در ٤ سال، ۷۹۹ میلی‌متر است. همچنین در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که بین فرونشست و مناطق استخراج نفت همبستگی وجود دارد و کشف شده که مقادیر بالای فرونشست اکثراً در مناطقی است که چاه‌های نفت وجود دارند (سان و همکاران، ۲۰۱۷)[10]. همچنین تحقیقی ارائه شده است که حداکثر نرخ فرونشست در شهر پیزا[11] ایتالیا را با دو مجموعه داده‌ی ERS 1/2[12] و انویست با استفاده از روش PSInSAR در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰، ۲۰ میلی‌متر در سال برای هر دو داده به دست آورده‌اند، مطالعاتی که روی بخش شرق این منطقه انجام داده‌اند نشان داده است که بین قدمت ساختمان‌ها و نرخ فرونشست همبستگی وجود دارد، به این صورت که در ساختمان‌های با قدمت کمتر نرخ فرونشست کمتری تخمین زده شده است (سولاری و همکاران، ۲۰۱٦) [13]. در تحقیقی دیگر فرونشست در دشت بئیجینگ[14] چین در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش PSInSAR به دست آورده شده و سپس ارتباط بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۱٤ و ۲۰۱۸ در چهار آبخوان بررسی کرده‌اند. حداکثر مقادیر

1 Jo et al.
2 Envisat SAR
3 Békési et al.
4 Incheon
5 Busan
6 Japanese Earth Resource Satellite-1
7 Juan
8 Kim et al.
9 Liaohe
10 Sun et al
11 Pisa
12 European Remote-Sensing Satellite
13 Solari et al.
14 Beijing

کرولیشن ارائه شده در این مقاله برای این چهار آبخوان، ۰/۳۵، ۰/۷۳، ۰/۸ و ۰/۵ است (چن و همکاران، ۲۰۲۰)[1]. در مقاله‌ای فرونشست تایوان با جی‌پی‌اس محاسبه و سپس رابطه خطی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۹۹٤ تا ۲۰۰٦ را به دست آورده‌اند، در این مقاله بر اساس نتایج، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را تأثیرگذارترین عامل در رخداد فرونشست این منطقه دانسته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۰). فرونشست سمارنگ[2] را در بازه زمانی ۲۰۱٤ تا ۲۰۱۷ را با استفاده از روش PSInSAR و تصاویر سنتینل محاسبه شده که حداکثر فرونشست در منطقه ٤/٥- سانتیمتر است، سپس همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را ٤۷/٥۸ درصد به دست آورده‌اند (فیرداوس و همکاران، ۲۰۱۸)[3]. در پژوهشی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را بررسی شده است، در این تحقیق ابتدا فرونشست را با استفاده از روش تداخل سنجی راداری محاسبه و سپس همبستگی بین نرخ فرونشست و نرخ افت سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۱ را محاسبه کرده‌اند (مقادیر همبستگی در این بازه زمانی بین ۰/٦ تا ۰/۹) و رابطه خطی بین این دو پارامتر را به دست آورده‌اند (زارعی و همکاران، ۱۳۹۹). بر خلاف مقالات ذکر شده که رابطه خطی و مستقیم بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ارائه داده‌اند، نتایج این تحقیق در مورد رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان نشان می‌دهد که در همه مناطق نمی‌توان رابطه خطی بین فرونشست و سطح آب زیرزمینی به دست آورد و مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر با توجه به ویژگی‌های منطقه تغییر می‌کند. به دلیل اینکه فرونشست تحت تأثیر چندین عامل طبیعی و انسانی است نباید تنها اثر یک عامل بررسی شود.

۲- منطقه موردمطالعه

استان اصفهان در مرکز ایران واقع شده است، این استان با مساحتی حدود ۱۰٥۹۳۷ کیلومترمربع بین ۳۰ درجه و ٤۳ دقیقه تا ۳٤ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ٤۹ درجه و ۳٦ دقیقه تا ٥٥ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، این استان دارای ۱۷ شهرستان، ٦۰ شهر، ۳۷ بخش و ۱۱٦ دهستان و مرکز آن اصفهان است. اصفهان منطقه‌ای خشک و کم باران است که مستعد وقوع فرونشست است که دو دلیل مهم تأثیرگذار عدم مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی وعدم جریان دائمی زاینده‌رود باعث تشدید آن شده است. حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۹ درجه سانتی‌گراد است که تابستان‌هایی گرم و خشک را می‌سازد و در زمستان حداکثر به ۱۸- درجه می‌رسد. اصفهان یکی از کلان‌شهرهای ایران است و به دلیل بناهای تاریخی متعدد دارای شهرت جهانی است. برای حفظ و مراقبت از بناهای تاریخی و به دلیل اهمیت و وسعت و جمعیت این منطقه، بررسی و مطالعه‌ی فرونشست و جلوگیری از پیشروی آن در مناطق مسکونی حیاتی است. البته

1 Chen et al.
2 Semarang City, Indonesia
3 Firdaus et al.

در سـال‌های اخیر مشـاهداتی از وجود فرونشـست در نزدیکی آثار تاریخی وجود دارد و در آینده آثار تاریخی در معرض خطر جدی فرونشـست قرار خواهد گرفت. مسـاحت کل منطقه موردمطالعه این تحقیق ۷۵۱٦ کیلومترمربع است (شکل ۱).

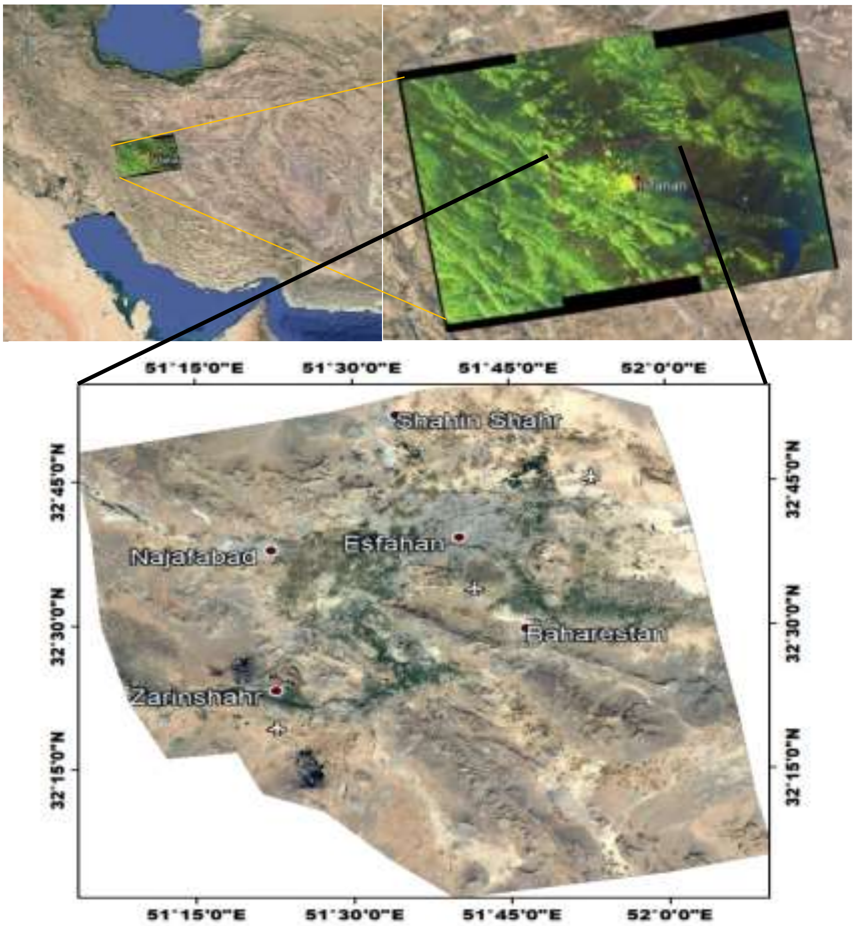
۳- داده‌های مورداستفاده

داده‌های مورداستفاده در این تحقیق شامل ۷۳ تصویر راداری سنتینل با فرمت SLC در بازه زمانی ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۰ در عبور بالاگذر[1] در مسـیر[2] شـماره ۲۸ ماهواره اسـت، این تصـاویر در باند C معادل طول موج ٥/٥٤ سـانتی‌متر و فرکانس ٥/٤۰٥ گیگا هرتز، با زاویه فرود ۳۹/٥۰٥۸° با دو پلاریزاسـیون VV,VH درمد IW[3] و عرض تصـویربرداری ۲٥۰ کیلومتر با قدرت تفکیک مکانی ۱۳/۹٥×۳/٦۷ متر اخذ شده‌اند. از مدل ارتفاعی رقومی SRTM با قدرت تفکیک مکانی سه ثانیه (۹۰ متر) در روند پردازش PSInSAR، برای محاسبه فرونشست استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر راداری مورداستفاده در پژوهش

داده	تعداد تصاویر	بازه زمانی تصاویر	فرمت داده	مدتصویربرداری	شماره مسیر	جهت مدار	قدرت تفکیک در جهت آزیموت (متر)	قدرت تفکیک در جهت رنج (متر)
سنتینل ۱	۷۳	۲۰۱٤-۲۰۲۰	SLC	IW	۲۸	بالا گذر	۱۳/۹٥	۳/٦۷

1 Ascending
2 Track
3 Interferometric Wide



شکل ۱- محدوده موردمطالعه پژوهش

برای حذف اثرات فصلی در همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان‌ها و فرونشست در ماه شهریور سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است. در شهریور ماه مقدار بارندگی منطقه موردمطالعه و برداشت از آبخوان حداقل است، بنابراین این ماه بهترین ماه برای بررسی سطح آب زیرزمینی است. از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه اصفهان برای بررسی خصوصیات جنس خاک منطقه و تأثیر آن بر فرونشست استفاده شد. با توجه به این نقشه جنس خاک در منطقه موردمطالعه در این پژوهش آبرفت، شیل، تراس و سنگ‌آهک است. تمام چاه‌های پیزومتری مورداستفاده در این تحقیق در مناطق با جنس آبرفت و تراس واقع شده‌اند.

٤- تداخل سنجی راداری

تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که از تداخل امواج الکترومغناطیس جهت رسیدن به اطلاعات مفید مانند تهیه مدل رقومی ارتفاعی، میزان جابه‌جایی زمین و ... استفاده می‌کند. این تکنیک از اختلاف فاز زوج تصویر راداری استفاده می‌کند، بنابراین پارامتر فاز امواج نقش اساسی را در این تکنیک دارند. روش تداخل‌سنجی تفاضلی مرسوم[1] و روش‌های تحلیل سری زمانی مانند طول خط مبنای کوتاه[2] و تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی از روش‌های تداخل‌سنجی تفاضلی است. با وجود اینکه روش تداخل‌سنجی تفاضلی مرسوم[3] جابه‌جایی‌های زمین را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کند، نمی‌تواند نقاطی را که بازپراکنش آن‌ها با زمان تغییر می‌کند به دلیل عدم همبستگی‌های زمانی موردبررسی قرار دهد. مناطق پوشیده از برف، زمین‌های با پوشش گیاهی و جنگل‌ها ازجمله مناطق با مشکل عدم همبستگی هستند. با توجه به اینکه در روش‌های تحلیل سری زمانی از مجموعه‌ای از تداخل‌نماها در یک بازه زمانی استفاده می‌شود، عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثرات اتمسفر کاهش می‌یابد بنابراین این دسته از روش‌ها از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی مرسوم دقیق‌تر هستند.

٤-١-تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم (PSInSAR)

ازجمله محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری مرسوم، عدم همدوسی تصاویر مانع از تولید تداخل‌نماهای تفاضلی می‌شود، خطای توپوگرافی باقیمانده در تداخل‌نما (بزرگی این خطا به کیفیت DEM و خط مبنای قائم وابسته است) می‌باشد که این محدودیت‌ها سبب توسعه روش PSInSAR شده است. روش PSInSAR استاندارد را اولین بار فرتی و همکاران (۲۰۰۱) مطرح کردند، این روش با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی معمول (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر) با استفاده از نقاط همدوس در بازه زمانی آنالیز به‌دقت پایش میلی‌متری فرونشست می‌رسد. درصورتی‌که تراکم نقاط پراکنشگر کم باشد، تخمین فاز اتمسفر و حذف آن امکان‌پذیر نیست (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱)[4]. روش PSInSAR به‌عنوان یک ابزار قوی برای تخمین جابه‌جایی‌های کوچک در مناطق شهری بزرگ‌مقیاس در طول بازه‌ی زمانی‌های بلندمدت یا کوتاه‌مدت شناخته شده است. پراکنشگرهای دائمی نقاطی است که در طول زمان فاز آن‌ها ثابت می‌ماند، با استفاده از این پراکنشگرهای دائمی فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقیمانده توپوگرافی و نویز حذف می‌شود. اشکال این روش فقدان پیوستگی بین داده‌هاست، داده‌ها مجموعه‌ای از نقاط است که پراکندگی آن‌ها به شکل و کاربری منطقه بستگی دارد، این نقاط در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ فراوان ولی در مناطق با پوشش گیاهی اندک است، درنتیجه روش

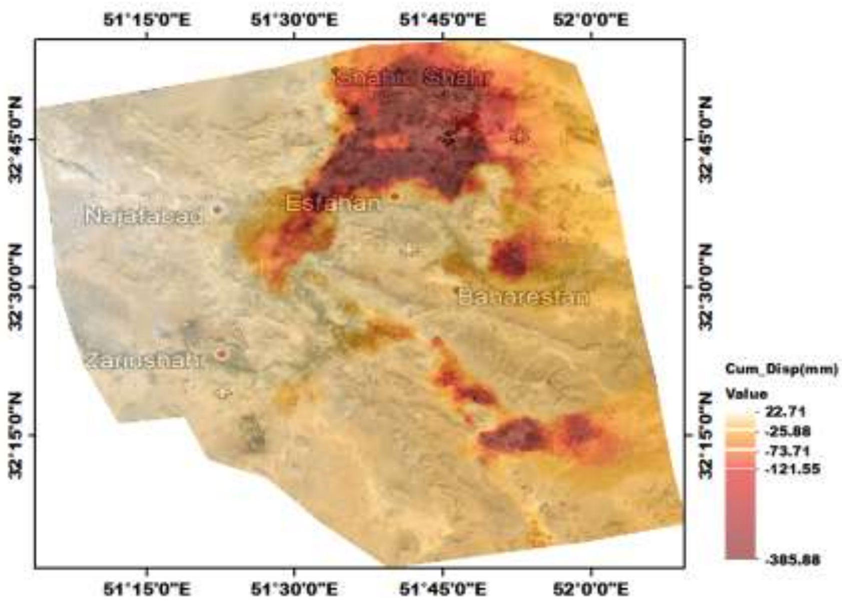
1 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)
2 Small Baseline Subset (SBAS)
3 Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)
4 Ferretti et al.

PSInSAR بهترین عملکرد را در مناطق شـهری و مناطق با جنس سنگ دارد (اوستیر و همکاران، ۲۰۰۷)[1]. داده‌های موردنیاز، n+1 تصویر راداری منطقه با فاصله زمانی‌های مناسب است که یک تصویر به‌عنوان تصویر پایه (master) و n تصـویر به‌عنوان تصـاویر پیرو (slave) در نظر گرفته می‌شـوند. تصـویر پایه بر این اساس انتخاب می‌شود که عدم همبسـتگی مکانی و زمانی تصـاویر مینیمم شـود به‌عبارت‌دیگر به ازای تداخل‌نماهای تشکیل شده برمبنای آن، مقدار همدوسـی تجمعی آن بیشینه شود. بعد از انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی در مجموعه تداخل‌نماها با یکی از سه روش پراکندگی دامنه بر مبنای شـاخص پراکندگی دامنه، روش مبتنی بر پایداری فاز و روش مبتنی بر همبسـتگی، بین این نقاط شـبکه‌ای با اسـتفاده از روش مثلث‌بندی دلونی[2] تشکیل می‌شود. این شبکه اساس تخمین فاز ناشی از اتمسفر و افزایش نقاط PS اسـت، به علت مجاور بودن نقاط در شـبکه و همبسـته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین دو پیکسـل همسـایه فاز اتمسـفر حذف خواهد شـد (هانسـن[3]، ۲۰۰۱). در مثلث‌بندی بین نقاط اگر طول اتصـالی از همبسـتگی اتمسـفر بیشـتر باشد آن اتصال حذف می‌شود تا افزونگی اتصالات کاهش یابد و دقت تخمین جابه‌جایی زمین افزایش یابد.

۵- نتایج تحقیق

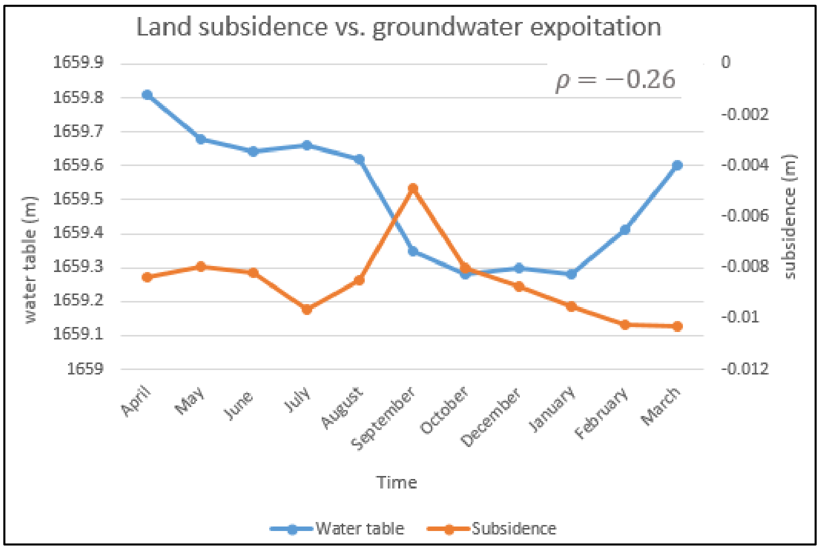
به‌منظور بررسی جابه‌جایی‌های زمین در اصفهان و چند منطقه اطراف آن، نقشه جابه‌جایی با ۷۳ تصویر Sentinel-A از روش PSInSAR تهیه شـد. حداکثر مقدار تجمعی فرونشـست منطقه اصفهان در بازه ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۰، تقریباً به ٤۰ سـانتی‌متر رسـیده اسـت؛ با توجه به نقشـه زمین‌شـناسـی و نقشـه فرونشست تجمعی منطقه، مشخص است که فرونشـسـت در مناطق با جنس آبرفت و تراس اتفاق افتاده است و در مناطق با جنس شیل و سنگ‌آهک فرونشست مشاهده نشده است (شکل ۲).

1 Oštir et al.
2 Delaunay triangulation
3 Hanssen

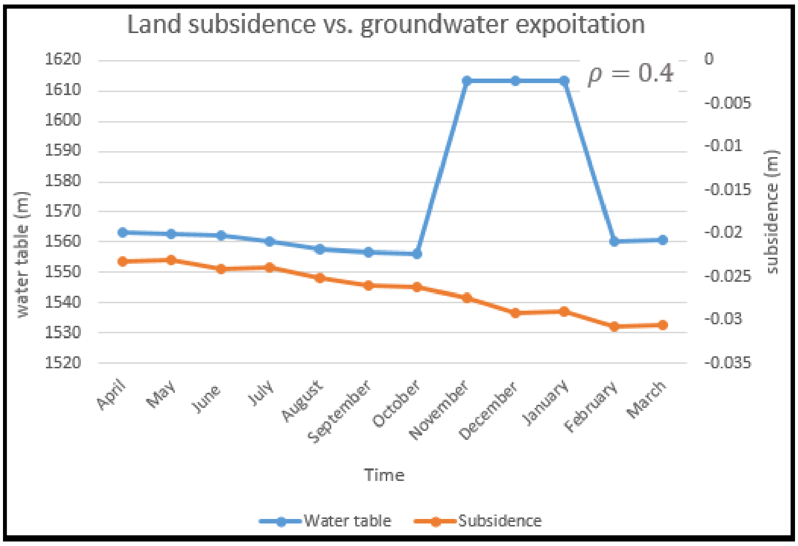


شکل ۲- مقادیر تجمعی فرونشست منطقه موردمطالعه در بازه ۲۰۱٤ تا ۲۰۲۰

سری زمانی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۷ در چاه جاده پرزان در دشت مهیار جنوبی- دشت آسمان و کروچ و شرودان دشت فلاورجان رسم شده است (شکل ۳ و شکل ٤)، همبستگی این دو پارامتر در چاه جاده پرزان در طول یک سال ۰/۲٦- و در کروچ و شرودان ۰/٤ است که این نشان می‌دهد در این بازه یک ساله این دو پارامتر رفتار مستقلی دارند. به ازای افت سطح آب زیرزمینی در یک چاه، ممکن است فرونشست با تأخیر زمانی اتفاق بیفتد و دقیقاً همزمان با افت آب، فرونشست مشاهده نشود که البته در این مسئله جنس خاک منطقه در رخداد فرونشست تأثیرگذار است. نوسانات سطح آب در ماه‌های مختلف به دلیل برداشت‌ها و بارندگی نیز در این همبستگی تأثیرگذار است، بنابراین بازه زمانی یک سال برای بررسی رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی مناسب نیست.



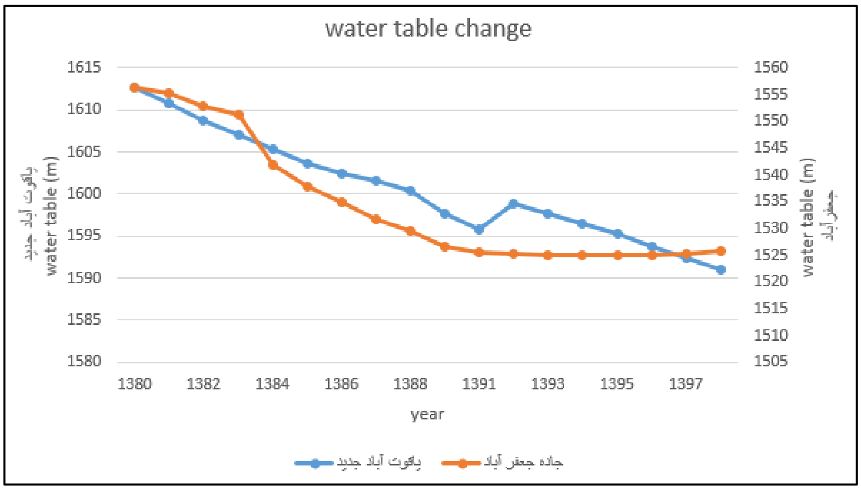
شکل ۳- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه پرزان در سال ۱۳۹۷



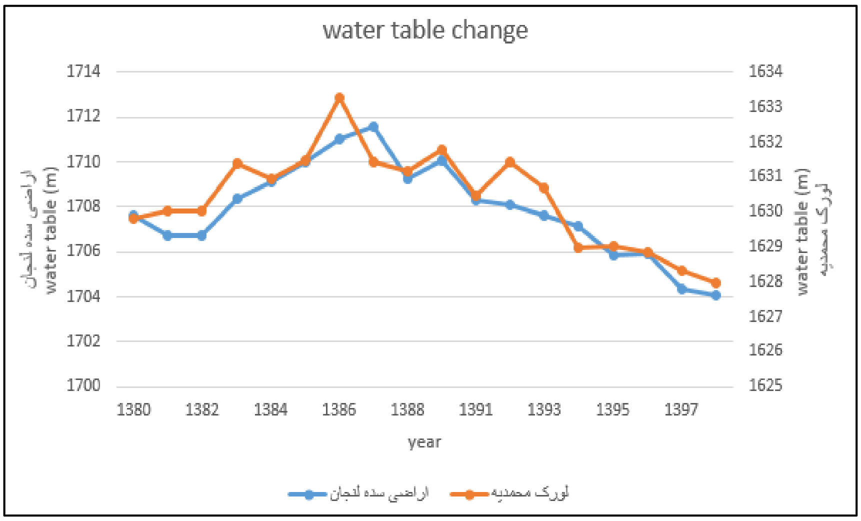
شکل ٤- سری زمانی تغییرات فرونشست و سطح آب زیرزمینی چاه کروچ و شرودان در سال ۱۳۹۷

برای بررســی میزان تغییرات ســطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری، نمودار تغییرات ســطح آب زیرزمینی چند نمونه چاه در دشــت‌های منطقه موردمطالعه رســم شـد. نمودار تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه یاقوت آباد جدید و چاه جاده جعفرآباد در محدوده اصـفهان-برخوار و چاه لورک محمدیه و اراضـی سـده لنجان در دشــت لنجانات در شـکل ۵ و شـکل ٦ آورده شـده اسـت، نمودارها بیانگر روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در این چاه‌ها است، مقدار

کاهش ســـطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد ۲۰/۲٦- متر و در یاقوت آباد جدید ۳۱/۱۱- متر، در لورک محمدیه ۱/۸۲- متر و در اراضی سده لنجان ۳/۵۵- متر در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ است.



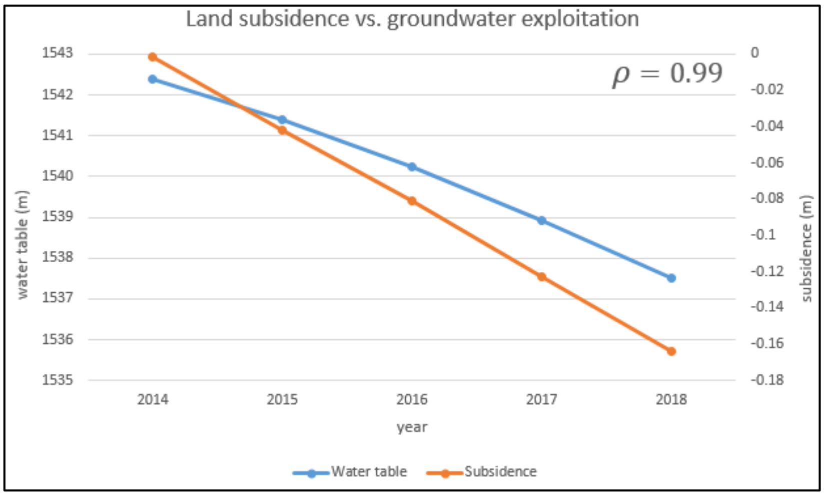
شکل ۵- تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه جاده جعفرآباد و یاقوت آباد جدید



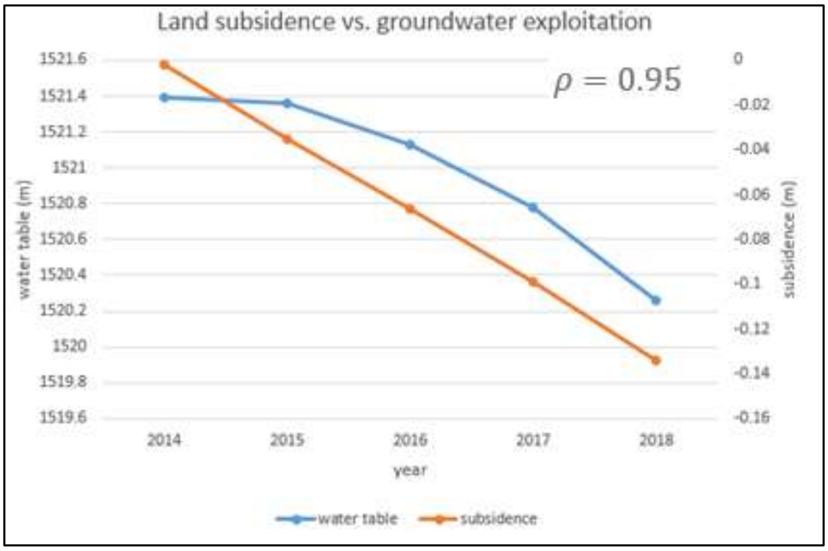
شکل ٦- تغییرات سطح آب زیرزمینی لورک محمدیه و اراضی سده لنجان در دشت لنجانات

برای مقایسه روند تغییر سطح آب زیرزمینی و فرونشست برای نمونه در محدوده اصفهان-برخوار چاه یونارت و چاه سه راهی سهل‌آباد، رفتار افت سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۷ و شکل ۸ آورده شـده اسـت، نمودارها نشان می‌دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در یونارت به ازای ٤/۸۹ متر افت سطح آب

زیرزمینی ۱۶ سانتیمتر فرونشست و در سه راهی سهل‌آباد به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۱۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در یونارت ۰/۹۹ و در سه راهی سهل‌آباد ۰/۹۵ است.



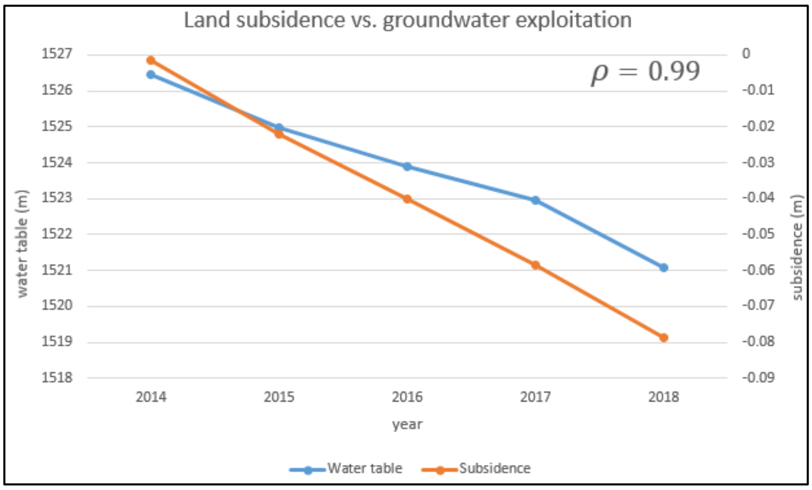
شکل ۷- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (یونارت)



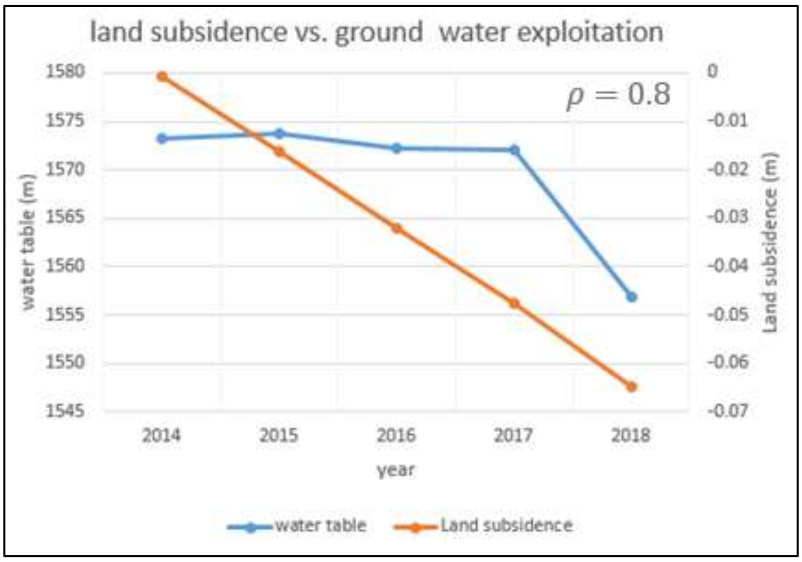
شکل ۸- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه اصفهان برخوار (سه راهی سهل آباد)

در محدوده اصفهان کوهپایه سگزی (جوزدان) و محدوده فلاورجان (کروچ و شرودان) رفتار تغییرات سطح آب زیرزمینی و رفتار فرونشست در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در شکل ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است، نمودارها نشان

می‌دهند که در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در جوزدان به ازای ۵/۳۹ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۸ سانتیمتر فرونشست، در کروچ و شـرودان به ازای ۱٦/۲۵ متر افت آب زیرزمینی، ۷ سـانتیمتر فرونشـسـت داشـته اسـت. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ و در کروچ و شرودان ۰/۸ است.



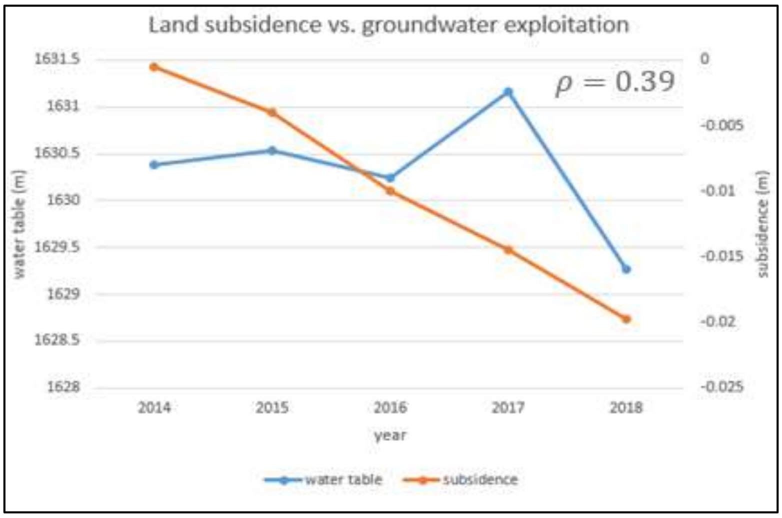
شکل ۹- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه کوهپایه سگزی (جوزدان)



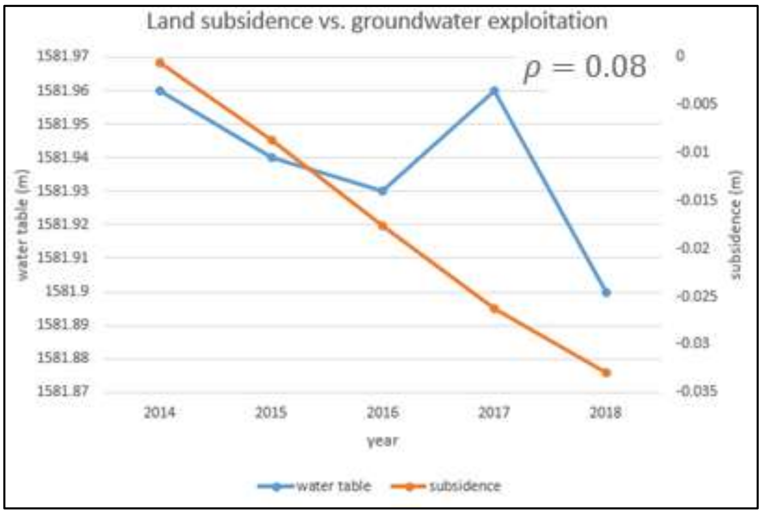
شکل ۱۰- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در کروچ و شرودان

در محدوده مهیار جنوبی-دشـــت آســـمان (شـــمال آجر تاکی) و محدوده نجف‌آباد (غرب درچه) نمودار خطی فرونشـــست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ رسم شده است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲). در شمال

آجر تاکی به ازای ۱/۱۳ متر افت سطح آب زیرزمینی، ۲ سانتیمتر فرونشست و در غرب درچه به ازای ٦ سانتیمتر افت سطح آب زیرزمینی، ۳ سانتیمتر فرونشست داشته است. مقدار همبستگی فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در منطقه شمال آجر تاکی ۰/۳۹ و در غرب درچه ۰/۰۸ است.



شکل ۱۱- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مهیار جنوبی-دشت آسمان (شمال آجر تاکی)

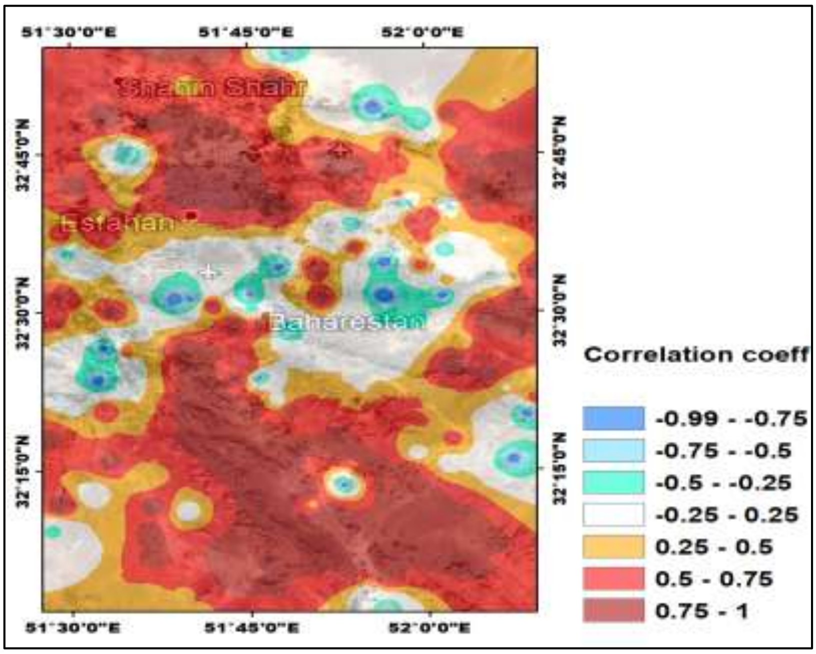


شکل ۱۲- فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه نجف‌آباد (غرب درچه)

تمام پیزومترها در منطقه موردمطالعه در این تحقیق در مناطق با خاک آبرفت و تراس هستند به همین دلیل افت سطح آب زیرزمینی باعث می‌شود، آب از بین ذرات خاک برداشته شده و تنش مؤثر وارد بر ذرات خاک افزایش یافته

و خاک متراکم می‌شود درنتیجه فرونشست در مناطق با خاک آبرفتی و تراس مشاهده شده است ولی در مناطق با جنس شیل و سنگ‌آهک به دلیل تحکیم و تراکم‌پذیری پایین آن‌ها فرونشست در این مناطق مشاهده نشده است.

مقادیر همبستگی فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ درشکل ۱۳ شکل ۱۳ آورده شده است، طبق این نقشه ۱۲٪ همبستگی‌های بین ۰/۲۵- تا ۰/۲۵ که در این بازه همبستگی بین دو پارامتر وجود ندارد، بنابراین در این مناطق علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی عوامل دیگری مثل جنس خاک، شیب، جهت شیب گسل و ... در رخداد فرونشست تأثیرگذار هستند. ۹٪ همبستگی ضعیف و مثبت (همبستگی‌های بین ۰/۲۵ تا ۰/۵)، ۱۲٪ همبستگی متوسط و مثبت (همبستگی بین ۰/۵ تا ۰/۷۵) و ٤٨٪ همبستگی قوی و مثبت (همبستگی بین ۰/۷۵ تا ۱)، ٦٪ همبستگی ضعیف و منفی (۰/۵- تا ۰/۲۵-)، ٤٪ همبستگی متوسط و منفی (۰/۷۵- تا ۰/۵-) و ۹٪ همبستگی قوی و منفی (۱- تا ۰/۷۵-) بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. محدوده‌ها با همبستگی قابل‌توجه مثبت (۰/۵ تا ۱) به این معنی است که در این مناطق به ازای افت سطح آب زیرزمینی فرونشست در منطقه اتفاق افتاده است و جنس خاک منطقه هم آبرفت و رس بوده است که باعث شده است با تخلیه آب از منافذ خاک، خاک متراکم شده و فرونشست اتفاق بیفتد. درصورتی‌که خاک منطقه از نوع کانی رس باشد بنابراین رس فعال است در صورت متراکم شدن غیرقابل نفوذ می‌شوند و آبخوان قابلیت احیا نخواهد داشت ولی درصورتی‌که از نظر دانه‌بندی، رس گفته شود، ممکن است خاک ریزدانه باشد ولی از نوع کانی رس نباشد و غیرفعال باشد در این صورت ممکن است قابلیت نفوذپذیری داشته باشد و دوباره آب در آن نفوذ کند.



شکل ۱۳- ضریب همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷

٦- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری دشت‌های اصفهان–برخوار، لنجانات، مهیارجنوبی، فلاورجان، نجف‌آباد و کوهپایه سگزی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ و همچنین همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ در منطقه اصفهان آورده شد. مقادیر همبستگی بین این دو پارامتر نشان می‌دهد که با توجه به اینکه عوامل مختلفی مثل جنس خاک منطقه، شیب، جهت شیب، ارتفاع و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و ... در رخداد پدیده فرونشست دخالت دارند، بررسی تنها یک عامل روش صحیحی برای پی بردن به علل به وجود آمدن فرونشست نیست. ارائه روابط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست ممکن است برای یک منطقه خاص قابل قبول باشد ولی در حالت کلی باید خصوصیات ویژه هر منطقه مثل جنس خاک، گسل، شیب و... هم در کنار تغییرات سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شود، برای مثال در منطقه‌ای که جنس خاک، خاک ریزدانه باشد، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب فرونشست می‌شود و ممکن است همبستگی بین این دو پارامتر بالا و رابطه خطی به دست آید ولی در منطقه‌ای با جنس خاک درشت دانه، ممکن است در صورت افت زیاد سطح آب زیرزمینی فرونشست کمتری مشاهده شود. رابطه خطی بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین فقط در حالت تئوری امکان‌پذیر است ولی در واقعیت رابطه فرونشست با چندین عامل مؤثر بر آن پیچیده‌تر از رابطه خطی است و عوامل مختلف مؤثر بر فرونشست باید همزمان بررسی شوند. تأخیر زمانی بین افت سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست هم در همبستگی بین این دو پارامتر مؤثر است، بنابراین رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی باید در بازه زمانی طولانی‌مدت بررسی شود. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، در مناطقی که همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ضعیف است یا همبستگی وجود ندارد، عوامل تأثیرگذار دیگر باید موردبررسی قرار گیرند تا با احتمال بیشتری بتوان دلیل فرونشست در این مناطق را شناسایی کرد. همان‌طور که در نتایج هم آورده شده است در بعضی از این مناطق با وجود افزایش سطح آب همچنان فرونشست زمین ادامه داشته است که این می‌تواند نشان‌دهنده‌ی عدم برگشت‌پذیر بودن منطقه نسبت به فرونشست باشد به‌عبارت‌دیگر حتی با احیای مجدد منابع آب زیرزمینی در این مناطق نمی‌توان شاهد بهبود وضعیت فرونشست بود. در این موارد باید دانه‌شناسی خاک و کانی‌شناسی انجام شود به‌طور مثال درصورتی‌که خاک منطقه از نظر کانی‌شناسی، رس باشد، این رس فعال است بنابراین در صورت برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی خاک متراکم شده و قابلیت جذب آب را نخواهد داشت و فرونشست رخ می‌دهد. درصورتی‌که از نظر دانه‌بندی، منطقه از رس باشد، این رس غیرفعال است و نسبت به خاک رس فعال، قابلیت جذب آب بیشتری دارد. در این تحقیق نشان داده شد که بررسی رابطه فرونشست و تنها یک عامل تأثیرگذار بر آن، صحیح نیست و در یافتن علت رخداد فرونشست کمکی نمی‌کند، زیرا پدیده فرونشست همزمان ممکن است تحت تأثیر چند عامل در منطقه موردنظر به وجود آید. پیشنهاد می‌شود برای

پی بردن به دلایل رخداد فرونشست از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بالاتر و اطلاعات مربوط به کانی‌شناسی و دانه‌بندی خاک منطقه استفاده و همچنین تأثیر عوامل دیگر مثل گسل و شیب، ارتفاع منطقه و ... همزمان بررسی شوند.

کتابنامه

زارعی، زاده رسول، صدیقی و همکاران؛ ۱۳۹۹. «تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب‌زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس)». *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، صص ۱٦۸–۱۸۲.

علیزاده، امین؛ ۱۳٦۷. *اصول هیدرولوژی کاربردی*. انتشارات آستان قدس رضوی، بنیاد فرهنگی رضوی.

A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca., 2001. “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing,* vol. 39, no. 1, pp. 8-20, https:// doi.org/ 10.1109/ 36.898661.

A. Rucci, A. Ferretti, A. M. Guarnieri, and F. Rocca., 2012. "Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements," *Remote Sensing of Environment,* vol. 120, pp. 156-163, https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030.

A. Tamburini, M. Bianchi, C. Giannico, and F. Novali., 2010. "Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring," *International Journal of Greenhouse Gas Control,* vol. 4, pp. 928-937.

B. Chen, H. Gong, Y. Chen, X. Li, C. Zhou, K. Lei, L. Zhu, L. Duan, and X. Zhao., 2020. “Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China,” *Science of the Total Environment,* vol. 735, pp. 139111.

C. H. Chen, C.-H. Wang, Y.-J. Hsu, S.-B. Yu, and L.-C. Kuo., 2010. “Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan,” *Engineering Geology,* vol. 115, no. 1-2, pp. 122-131.

Chung-Pai Chang, Jiun-Yee Yen, Andrew Hooper, Fong-Min Chou, Yi-An Chen, Chin-Shyong Hou, Wei-Chia Hung, and Ming-Sheng Lin. 2010. "Monitoring of Surface Deformation in Northern Taiwan Using DInSAR and PSInSAR Techniques," Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, doi: 10.3319/TAO.2009.11.20.01(TH).

E. Békési, P. A. Fokker, J. E. Martins, J. Limberger, D. Bonté, and J.-D. Van Wees., 2019. “Production-induced subsidence at the Los Humeros geothermal field inferred from PS-InSAR,” *geofluids*.

H. S. Firdaus, Y. Prasetyo, and D. Diyanah., 2018. "Spatial Correlation Analysis of Land Subsidence and The Water Table Changes in Unconfined Aquifers Using Sentinel 1-SAR Image and Geographic Information Systems (Case Study: Semarang City–Indonesia)." pp. 03022.

H. Sun, Q. Zhang, C .Zhao, C. Yang, Q. Sun, and W. Chen., 2017. “Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique,” *Remote sensing of environment,* vol. 188, pp. 73-84.

H. Wang, J. Mao, S. Zhao, X. Ning, and Q. Wu., 2021. "PS-InSAR based surface subsidence analysis in Changchun metropolitan area," in *E3S Web of Conferences*.

J.-s. Kim, D.-J. Kim, S.-W. Kim, J-.S. Won, and W. M. Moon., 2007. “Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR,” *Geosciences Journal,* vol. 11, no. 1, pp. 59.

Jo, M.J., Won, J.S. and Kim, S.W., 2011, September. A time-series observation of ground subsidence at Ulsan area using SAR interferometry. In *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)* (pp. 1-3). IEEE.

K. Biswas, D. Chakravarty, P. Mitra, and A. Misra., 2018. "Spatial Correlation Based Psinsar Technique to Estimate Ground Deformation in las Vegas Region, Us," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2251-225.

K. Malik, D. Kumar, D. Perissin, and B. Pradhan., 2021. "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data," *Advances in Space Research*.

K. Oštir, and M. Komac., 2007. "PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations a case of NW Slovenia," *Geologija*, vol. 50, no. 1, pp. 77-96.

L. Solari, A. Ciampalini, F. Raspini, S. Bianchini, and S. Moretti., 2016. "PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 120.

Liu, G., Jia, H., Zhang, R., Cen, M. and Zhang, T., 2010. Subsidence detection by PSInSAR based on high resolution TerraSAR-X images. Progress In Electromagnetics Research, 11.

M. Khorrami, B. Alizadeh, E. Ghasemi Tousi, M. Shakerian, Y. Maghsoudi, and P. Rahgozar. 2019. "How groundwater level fluctuations and geotechnical properties lead to asymmetric subsidence: A PSInSAR analysis of land deformation over a transit corridor in the Los Angeles metropolitan area," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 377.

R. F. Hanssen., 2001. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*: Springer Science & Business Media.

S. Xiong, C. Wang, X. Qin, B. Zhang, and Q. Li., 2021. "Time-Series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, pp. 546.